

## Array de microlentes de cristal líquido con control gradual de índice de refracción

### Liquid crystal microlenses with gradient refraction index control

J. F. Algorri<sup>(1,\*)</sup>, V. Urruchi<sup>(1)</sup>, J. M. Sánchez-Pena<sup>(1)</sup>, N. Bennis<sup>(2)</sup>, M. A. Geday<sup>(2)</sup>

1. Grupo de Displays & Aplicaciones Fotónicas, Dpto. de Tecnología Electrónica, E.P.S., Universidad Carlos III, Butarque 15, 28911, Leganés, Madrid, Spain.

2. CEMDATIC, ETSI Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid, Spain.

(\*) Email: [jalgorri@ing.uc3m.es](mailto:jalgorri@ing.uc3m.es)

Recibido / Received: 15/09/2011. Revisado / Revised: 25/10/2011. Aceptado / Accepted: 26/10/2011.

#### RESUMEN:

Se ha diseñado y construido un *array* de microlentes cilíndricas de cristal líquido (CL) y se ha llevado a cabo un estudio sobre su comportamiento electroóptico. El *array* lenticular es novedoso en cuanto a los materiales empleados en su fabricación. Se ha utilizado Níquel como material clave para la implementación de un electrodo de alta resistividad. La combinación del electrodo de alta resistividad junto al CL (cuya impedancia paralelo es elevada) da lugar a un divisor reactivo que proporciona un gradiente de tensión hiperbólico del centro al extremo de cada lente. Este efecto, unido al alineamiento homogéneo de las moléculas de CL, permite la generación de un gradiente de índice de refracción, comportándose el dispositivo como una lente GRIN (*GRadient Refraction INDEX*). Para la caracterización de su funcionamiento se ha analizado su perfil de fase empleando métodos interferométricos y procesamiento de imágenes. Además se han efectuado también diferentes medidas de contraste angular.

**Palabras clave:** Lente de Cristal Líquido, Retardo de Fase, Distribución Angular de Luminancia, Índice Gradual, Sintonizable por Tensión, Alta Resistividad.

#### ABSTRACT:

New one-dimensional arrays of cylindrical liquid crystal (LC) lenses have been designed and manufactured. A study about the electrooptical performance of these devices has been carried out. Lenticular arrays are innovative as regards used materials in the structure. Nickel has been used as a key material for generating a high resistivity electrode. The high resistivity electrode next to the LC (with high parallel impedance) gives rise to a reactive divider that provides a hyperbolic voltage gradient from the center towards the edge of each LC lens. This effect, together with a homogeneous alignment of the LC, causes a radial gradient refractive index along each lens, so the final device behaves such a GRIN (*GRadient Refraction INDEX*) lens. For characterizing these lenses, the phase profiles were measured by convectional interferometric techniques and image processing. Also, angular luminance distributions through the lenses have been measured.

**Key words:** Liquid Crystal Lens, Phase Retardation, Luminance Angular Distribution, Gradual Index, Electrically Tunable, High Resistivity.

#### REFERENCIAS Y ENLACES / REFERENCES AND LINKS

- [1]. J. Park, *A Liquid Lens Based on Electrowetting*, Ms. Thesis. Louisiana State University (2007).
- [2]. C. A. López, C. Lee, A. H. Hirs, "Electrochemically activated adaptive liquid lens", *Appl. Phys. Lett.* **87**, 134102 (2005).
- [3]. S. Sato, "LC lens-cell with variable focal length", *Jpn. J. Appl. Phys.* **18**, 1679-1684 (1979).

- [4]. D. S. Cleverly, *Creation of a Lens by Field-Controlled Variation of the Index of Refraction in a Liquid Crystal*, Ph.D. Dissertation Syracuse University, Syracuse, N.Y. (1982).
- [5]. N. Fraval, J. L. de Bougrenet, "Low aberrations symmetrical adaptive modal liquid crystal lens with short focal lengths", *Appl. Opt.* **15**, 2778-2783 (2010).
- [6]. V. V. Presnyakov, K. E. Asatryan, T. V. Galstian, "Polymer-stabilized liquid crystal for tunable microlens applications", *Opt. Express* **10**, 865-870 (2002).
- [7]. M. Ye, B. Wang, S. Sato, "Effects of dielectric constant of glass substrates on properties of liquid crystal lens", *IEEE Photonics Tech. L.* **19**, 1295-1315 (2007).
- [8]. J. Harrold, D. J. Wilkes, G. J. Woodgate "Switchable 2D/3D display-solid phase liquid crystal microlens array", *Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Display Workshop*, pp. 1495-1496 (2004).
- [9]. C. W. Fowler, "Liquid crystal lens review", *Ophthalm. Physiol. Opt.* **10**, 186-194 (1990).
- [10]. D. Daly, R. F. Stevens, M. C. Hutley, N. Davies, "The manufacture of microlenses by melting photoresist", *Meas. Sci. Technol.* **1**, 759-766 (1990).
- [11]. M. Ye, B. Wang, S. Sato, "Realization of liquid crystal lens of large aperture y low driving voltages using thin layer of weakly conductive material", *Opt. Express* **16**, 4302-4308 (2008).
- [12]. T. Nose, S. Sato, "Optical properties of a liquid crystal microlens", *Proc. SPIE* **1230**, 17-20 (1990).
- [13]. S. Sato, "Applications of liquid crystals to variable-focusing lenses", *Opt. Rev.* **6**, 471-485 (1999).
- [14]. G. D. Love, A. F. Naumov, M. Loktev, I. R. Guralnik, G. V. Vdovin, "Liquid-crystal adaptive lenses with modal control", *Opt. Lett.* **23**, 992-994 (1998).
- [15]. P. J. W. Hands, A. K. Kirby, G. D. Love, "Adaptive modally addressed liquid crystal lenses", *Proc. SPIE* **5518**, 136-143 (2004).
- [16]. A. I. Oliva, "Nuevas propiedades físicas de materiales nanoestructurados", *Ingeniería Revista Académica* **9**, 39-46 (2005).

## 1. Introducción

El empleo de lentes y microlentes tiene gran variedad de aplicaciones. Actualmente se están realizando numerosos esfuerzos para crear lentes compactas con distancias focales variables sin partes móviles para sistemas limitados en espacio. Existen varios métodos para crear este tipo de lentes, cambiando el índice de refracción o mediante el cambio de la forma de la lente por ejemplo utilizando *electrowetting* [1] o recurriendo a lentes de tensión superficial [2]. Otro sistema para conseguir lentes más delgadas, de menor peso, menor consumo y mayores potencias focales, es el empleo de cristales líquidos (CL).

La primera publicación sobre la creación de lentes con CL data de 1979 [3]. En este trabajo se analiza la creación de una lente de CL con control electrónico para su uso como mecanismo de enfoque en un sistema de lentes multi-elemento o como un elemento óptico adaptativo. Este primer tipo de lentes empleaba una gran cantidad de electrodos para lograr un gradiente de tensión apropiado. A partir de entonces, se comienzan a investigar sus posibilidades [4]. Las aplicaciones de estos dispositivos son tan

numerosas como lo pueden ser las aplicaciones de las lentes fijas o las lentes de índice gradual (orientación del haz, cámaras en miniatura, correctores ópticos, aparatos e instrumentos ópticos para aplicaciones de telecomunicación, sistemas de visualización 3D, etc.), con la gran ventaja de reducción de peso, distancia focal sintonizable por tensión y bajo consumo. En los últimos años se han desarrollado varias técnicas, basadas en CL, entre ellas cabe destacar el control modal [5], la estabilización con gel de polímero [6], lentes con electrodos modelados con [7], lentes de superficie curvada [8], lentes de Fresnel [9], lentes inmersas [10] y otras de menor relevancia.

Una de las estructuras más empleadas son las lentes de CL con electrodos modelados. Estas basan su funcionamiento en el gradiente de campo eléctrico creado en el CL a partir de las ecuaciones de Maxwell. Si se construyen dispositivos con distancias apropiadas entre CL y electrodo (a través de la inclusión de medios dieléctricos intermedios), y el tamaño del electrodo se conjuga acorde con dicha distancia [11], se pueden obtener gradientes de tensión que den lugar a lentes sintonizables a partir de

dicha tensión. Este método suele emplear varios electrodos (normalmente 2) para formar el gradiente y los valores de tensión implicados suelen ser elevados ( $>50V_{rms}$ ); valores de tensión inferiores son insuficientes para la conmutación de las moléculas de CL. Una técnica basada en electrodos modelados es la de patrones de agujero (*hole patterned*) [12]. Este método supera las limitaciones de las tensiones elevadas y la necesidad de varias señales de control. Debido a que el electrodo modelado se sitúa directamente sobre el CL, las tensiones de control son muy reducidas ( $<3V_{rms}$ ). Su funcionamiento también está basado en el gradiente de tensión formado en el agujero. En particular, sus propiedades ópticas dependen de la relación entre las dimensiones del agujero, diámetro  $D$ , y el espesor de la célula,  $t$  (una relación óptima  $D/t$  es 2-3 [13]), dando lugar a lentes con apertura limitada y restringiendo el uso de esta tecnología fundamentalmente a la fabricación de microlentes.

Las lentes con control modal constituyen una alternativa a las estructuras descritas previamente, compartiendo con ellas el efecto del gradiente de campo generado en el cristal líquido. Como contrapartida, estas estructuras se pueden controlar con una única tensión (de bajo valor eficaz  $<10V_{rms}$ ) lo que redundaría en la simplificación de la electrónica de control. Este hecho permite la construcción de dispositivos lenticulares más complejos como *arrays* de microlentes (en dos dimensiones 2D) con patrones sencillos para el electrodo. En este estudio se ha trabajado con lentes de control modal.

Las lentes modales fueron desarrolladas por A. F. Naumov *et al.* a finales de los 90 [14]. Basan su funcionamiento en la generación de un gradiente de tensión que provoque un gradiente en el índice de refracción en la dirección radial de la lente simulando el funcionamiento de una lente de índice gradual GRIN. Para esto se emplea un electrodo de alta resistividad, que funciona como electrodo de control. La estructura típica de una lente modal consiste en: un electrodo de baja resistividad (funcionando como contraelectrodo) / una capa de cristal líquido / una capa de material de alta resistividad y un electrodo de control conectado

a la tensión de excitación (Fig. 1). El patrón de la máscara del electrodo de control se realiza acorde al tipo de lente: esférica, cilíndrica, etc.

La capa de alta resistividad se puede modelar eléctricamente como una línea de transmisión que, al conectarse a la capa de cristal líquido (modelada como el paralelo de una resistencia con un condensador), da lugar a un gradiente de campo eléctrico uniforme desde el centro al borde de la lente. Este gradiente se traduce en un perfil complementario para el retardo de fase de la lente (Fig. 2).

Dado el tamaño de las microlentes, la resistencia por cuadro debe ser elevada. De lo contrario, una resistencia demasiado pequeña, debido a las cortas distancias entre electrodos, podría perjudicar la formación del divisor reactivo apropiado entre electrodo y CL. Se toman como referencia valores de la resistencia por cuadro comprendidos en el rango  $1\text{ M}\Omega/\square - 100\text{ M}\Omega/\square$  [15] para los materiales candidatos, donde  $\square$  indica el cuadro. Así mismo, serán deseables estructuras de capas con estabilidad y repetitividad en los procesos de fabricación.

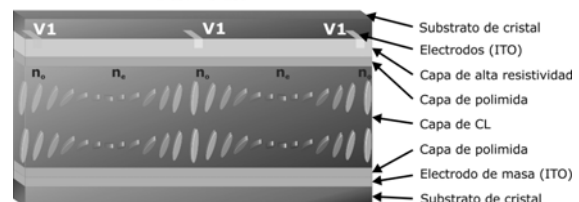


Fig. 1. Esquema simplificado de la sección de un microlente cilíndrica del CL con control modal. Se muestran únicamente dos lentes del array.

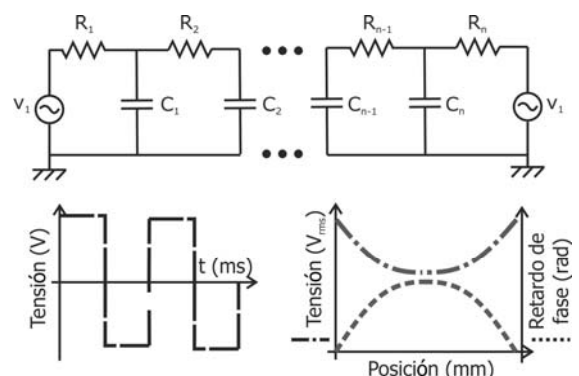


Fig. 2. Modelo eléctrico equivalente de una lente modal. Tensión aplicada al electrodo de control. Perfiles de tensión y retardo de fase en función de la distancia al centro de la lente.

## 2. Diseño de las microlentes

La propuesta de diseño del dispositivo consiste en un *array* de lentes cilíndricas de anchura (diámetro o pitch) micrométrica por lo que al conjunto de microlentes se le denomina lenticula. Para crear el gradiente de tensión se diseña una máscara formada por un conjunto de columnas de electrodos de ITO unidas y direccionadas por el mismo potencial. Al tratarse de lentes cilíndricas, la máscara del electrodo de control ha consistido en un electrodo con forma de peine (Fig. 3).

Las dimensiones del patrón de la máscara vienen determinadas por la distancia focal de la lente GRIN a diseñar. Esta es proporcional al radio de la lente al cuadrado e inversamente proporcional al producto del espesor de la lente y la birrefringencia del CL, con un factor 2. La distancia focal elegida ha sido 3mm. Con ello se proyecta un doble objetivo: controlar la capacidad de enfoque de la lente a corta distancia y, complementariamente, su potencia para desviar los haces a larga distancia (decenas de centímetros).

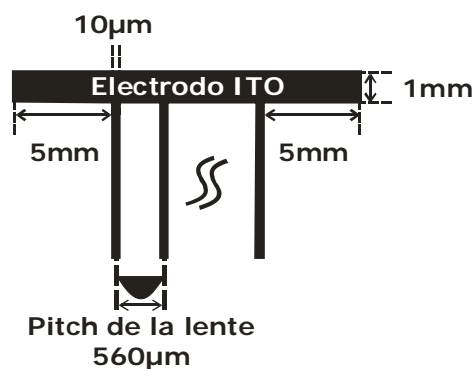


Fig. 3. Patrón de la máscara con forma de peine para el electrodo de control.

Una vez realizada la máscara, el siguiente paso lleva a la búsqueda de un electrodo de alta resistividad. Este es clave en el diseño ya que de él depende el gradiente de tensión generado sobre el CL. En este trabajo se plantea, por primera vez, el uso de materiales metálicos para la capa de alta resistividad. Se ha demostrado que la resistividad, propiedad intrínseca de los metales, experimenta un crecimiento no lineal a medida que disminuye el espesor de la capa del material considerado. Este efecto se ha descrito

para espesores de capa por debajo de 100 Angstroms (10 nm) [16]. Para el diseño de la lenticula se ha elegido el níquel por su bajo coste y sencillez de laminado mediante deposición por evaporación. La resistividad del níquel se incrementa de forma exponencial para espesores próximos a 70 Angstroms y se obtienen resistencias por cuadro de  $M\Omega/\square$ , en el orden de magnitud adecuado como se describió anteriormente.

## 3. Sistemas de caracterización

Para el estudio de la respuesta electroóptica de la lenticula previamente diseñada, se han planteado dos sistemas de caracterización. El objetivo, en primer lugar, es el análisis de la respuesta individual de cada lente de la lenticula analizando su perfil de retardo de fase. El efecto óptico de la lenticula conjunta se ha medido a partir de la distribución angular de la luz que pasa a través de esta.

### 3.1. Caracterización de una microlente individual

Para la medida del retardo de fase se aprovechan las propiedades birrefringentes del CL y su alineamiento homogéneo. En este ensayo se situó la lenticula entre polarizadores cruzados con su dirección de alineamiento a 45° del polarizador de entrada y se hizo pasar a su través un haz láser He-Ne a  $\lambda = 632,8$  nm. La captura de las imágenes tras el analizador (polarizador cruzado) se realizó con una cámara CCD conectada a un circuito controlador y al PC. El patrón capturado en la CCD es similar al obtenido por métodos interferométricos. Reproduce una serie de franjas claras y oscuras (franjas de interferencia) en el intervalo comprendido entre los dos electrodos de cada lente. Dichos estados de transmisión son el resultado de la birrefringencia del CL y de su capacidad de sintonización con la tensión. La diferencia de fases de las componentes ordinaria y extraordinaria de la luz en el material birrefringente se traduce en variaciones del estado de polarización a la salida (Fig. 4).

Para cada posición  $r$  (respecto del centro de la lente), existe un retardo de fase local,  $\phi(r)$ , similar al originado por un retardador de media

onda con birrefringencia efectiva  $\Delta n_{eff}(r)$ , en dicha posición. De este modo, el gradiente de tensión generado por la capa de alta resistividad, se traduce en un gradiente de birrefringencia efectiva: desde un valor máximo en el centro de cada lente, hasta un valor mínimo en los bordes, pasando por franjas consecutivas con diferencias de fase de valor  $2\pi$ . Para la obtención del perfil de franjas de interferencia se ha desarrollado un programa de tratamiento de las imágenes capturadas por la CCD que permite extraer, únicamente el perfil de retardo de fase. Debido al tamaño micrométrico de estas lentes se emplea un objetivo  $\times 10$  para una correcta observación de las franjas. La lentícula se excitó con señales cuadradas procedentes de un generador: entre capturas la frecuencia de la señal permaneció constante y se varió la amplitud.

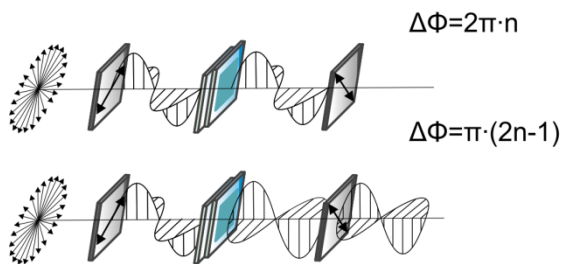


Fig. 4. Estados de transmisión claro y oscuro propios en materiales birrefringentes para fases múltiplos de  $2\pi$  (arriba) y fases impares de  $\pi$  (abajo).

### 3.2. Caracterización de una lentícula completa

La caracterización angular de la luminancia a la salida de una lentícula completa se ha realizado mediante el medidor VCMaster3D de ELDIM. Para ello, se ha implementado un montaje experimental sencillo como se muestra en la Fig. 5.

Se ha utilizado una pantalla como iluminación trasera que actúa como una lámpara de emisión uniforme tras la lentícula. La pantalla se ha escogido con una resolución tal que el pitch de la lentícula dobla el pitch de la pantalla y cada lente se alinea frente a dos columnas de píxeles de la pantalla. Con esta disposición, y con el objeto de medir la desviación de la luz de la pantalla, el motivo más sencillo mostrado en la pantalla está formado por columnas alternas de píxeles encendidos y apagados. Por otra parte, se

han tenido en cuenta las especificaciones del medidor angular para el correcto posicionamiento de la muestra: perpendicular a la horizontal y a una distancia de enfoque de 1,5 cm. El equipo VCMaster3D caracteriza un spot sobre la muestra de medida; en este caso las medidas se han realizado con un spot de 1mm. Para dicho spot mide la luminancia ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ) que vería un observador desde una posición angular determinada (Fig. 6). El punto de observación del usuario en el sistema se determina mediante coordenadas polares con: ángulo acimutal ( $\phi$ , entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$ ) y el ángulo de inclinación respecto de la normal al dispositivo ( $\theta$ , entre  $0^\circ$  y  $50^\circ$ ). Una vez capturadas y procesadas las imágenes se puede observar el resultado de la distribución angular de la luminancia en coordenadas polares utilizando un programa dedicado.

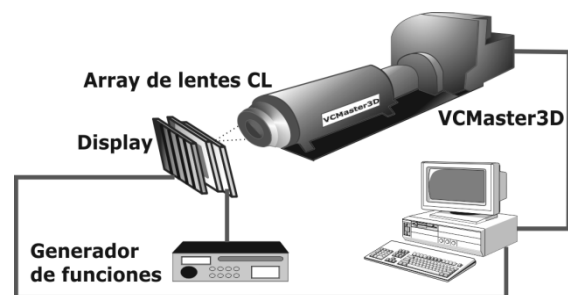


Fig. 5. Montaje experimental para la caracterización angular de la luminancia.

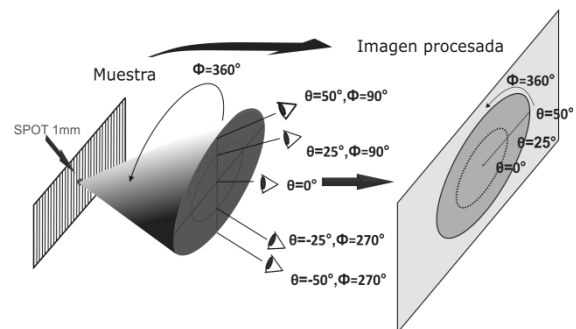


Fig. 6. Posición del observador respecto de la muestra y sistema de referencia de la luminancia en coordenadas polares.

## 4. Resultados y discusión

Se han obtenido dos conjuntos de resultados siguiendo los sistemas de caracterización anteriormente descritos. Estos resultados revelan las características y comportamiento de cada lente individual que forma una lentícula

mediante la medida del retardo de fase que introduce. Asimismo, la distribución angular de la luz en una lenticula completa mostrará la calidad global del dispositivo.

#### 4.1. Retardo de fase de una microlente

El retardo de fase de cada lente se mide en función de la posición y para diferentes tensiones aplicadas al dispositivo. En la Fig. 7 se muestran los patrones de interferencia tomados por la CCD y los perfiles de fase para los valores más representativos de tensión en valor eficaz. La anchura de las imágenes (mostradas a la izquierda de cada resultado), se corresponden con el diámetro de cada lente del *array*. Por otra parte, a la derecha de las imágenes, se muestran dos gráficas. En la gráfica superior se representan las curvas del patrón de interferencia (de un extremo a otro de la lente) en las que se identifican las crestas y valles de transmisión. Se han extraído de las imágenes

utilizando un programa de procesamiento desarrollado para tal fin, que distingue las zonas oscuras (desfase  $2\pi$ ) de las zonas claras (desfase  $\pi$ ). En la gráfica inferior se representan los desfases totales como suma acumulada de retardos en función de la posición sobre el diámetro de la lente.

En la primera imagen ( $1 V_{rms}$ ) se observa que el índice de refracción es constante en toda la superficie de la lente; la lente no se ha comenzado a formar debido a que la tensión es muy baja. Para tensiones pequeñas en el electrodo de control, por encima de la tensión umbral de conmutación del CL nemático, por ejemplo  $5 V_{rms}$ , se observa que la tensión transmitida al centro de la lente es inferior a la tensión umbral y por tanto insuficiente para excitar el CL en esta zona. A medida que se incrementa la tensión en el electrodo de control,

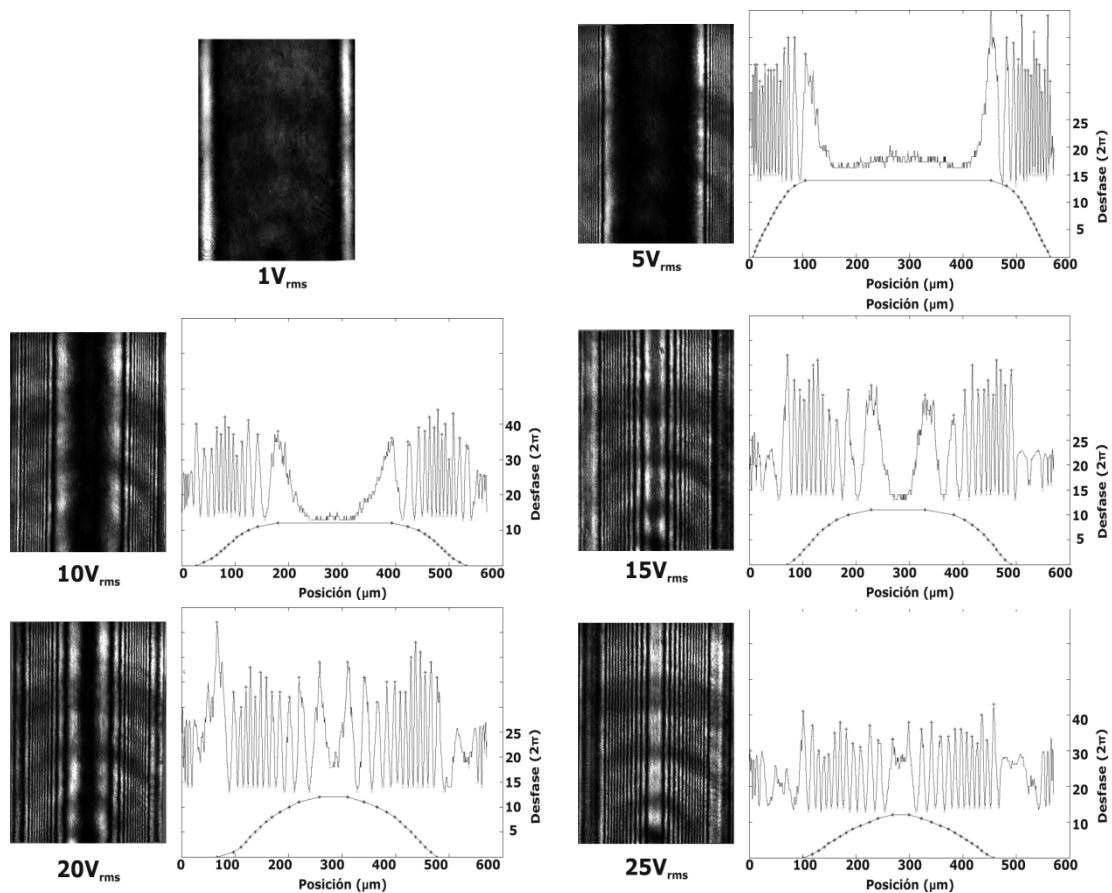


Fig. 7. Capturas de los patrones de interferencia de una lente en función de la tensión eficaz aplicada al electrodo de control y diagramas de fase correspondientes.

las franjas de interferencia avanzan hacia el centro de la lente disminuyendo la aberración esférica generando el perfil parabólico propio de las lentes convencionales. En este caso, el divisor de tensión sugerido entre la línea de transmisión (electrodo de alta resistividad) y la impedancia del CL conectada a tierra reproduce un reparto uniforme de tensión. A partir de  $10 V_{rms}$ , sin embargo, aparecen en el perfil del retardo dos efectos contrarios al diseño: un estrechamiento en la anchura efectiva de la lente y una limitación en el valor máximo del retardo respecto al obtenido a bajas tensiones ( $14 \times 2\pi$ ) (Fig. 7). El estrechamiento de la lente (disminución de su diámetro) indica la saturación de la inclinación de las moléculas en las zonas próximas a los bordes. Estos efectos limitan la birrefringencia efectiva haciendo que obtengamos una distancia focal mínima de 4.5mm, obtenida siguiendo la aproximación de Fresnel y la teoría de las lentes GRIN.

#### 4.2. Luminancia angular de una lentícula completa

La distribución angular de la luminancia a través de la lentícula se muestra en la Fig. 8. En todos los casos, el motivo de la pantalla de iluminación tras la lentícula consiste en un patrón, basado en una columna de píxeles encendidos junto a otra columna de píxeles apagados, que se repite a lo largo de toda su superficie. El uso de este sencillo motivo permite evaluar la calidad del patrón de luminancia que genera la lentícula. En el mejor caso, y para una distancia de observación definida, las microlentes desviarán la luz según el foco de las mismas, hacia un conjunto de direcciones específicas. Sobre el plano de observación estas direcciones se corresponden con un conjunto de zonas de observación. Es decir, programando la pantalla con el motivo descrito, la imagen en el plano de observación será un conjunto de franjas claras y oscuras perfectamente definidas. La desviación respecto del caso ideal da una medida de la calidad de la lentícula. Una buena discriminación entre zonas claras y oscuras (columna de píxeles encendida y apagada) significa un comportamiento apropiado de la lentícula diseñada, lo que permite plantear el uso de la misma en aplicaciones, por ejemplo de visión de varias imágenes según la posición o incluso de

visión estereoscópica (3D). Por el contrario, la falta de definición, debido principalmente a la luminancia residual en las zonas de observación oscuras, revela su malfuncionamiento.

Para  $0 V_{rms}$ , el CL dentro del array permanece en reposo sin formar el efecto de lente y, por tanto, la distribución de la luz no sufre ninguna desviación presentando un diagrama uniforme. Para  $5 V_{rms}$ , se ha superado la tensión umbral de conmutación y aparece el efecto de la lente diseñada. Es decir, la luminancia presenta para el ángulo de inclinación ( $\theta$ ), varias conjuntos de zonas oscuras/claras correspondientes a la distribución angular de la luz emitida por la columna de píxeles encendidos. La definición de la luminancia no es demasiado buena para cada zona existiendo zonas de paso directo de la luz. Este resultado se corresponde con el obtenido en el diagrama de fase, la cual es constante en el centro de la lente para dicha tensión. Para  $10 V_{rms}$ , la definición de zonas aumenta. A partir de  $15 V_{rms}$  se estrechan las lentes dejando, de nuevo, en los bordes de las mismas, zonas de paso directo de la luz de la pantalla sin la desviación apropiada y con los consiguientes aclarados en

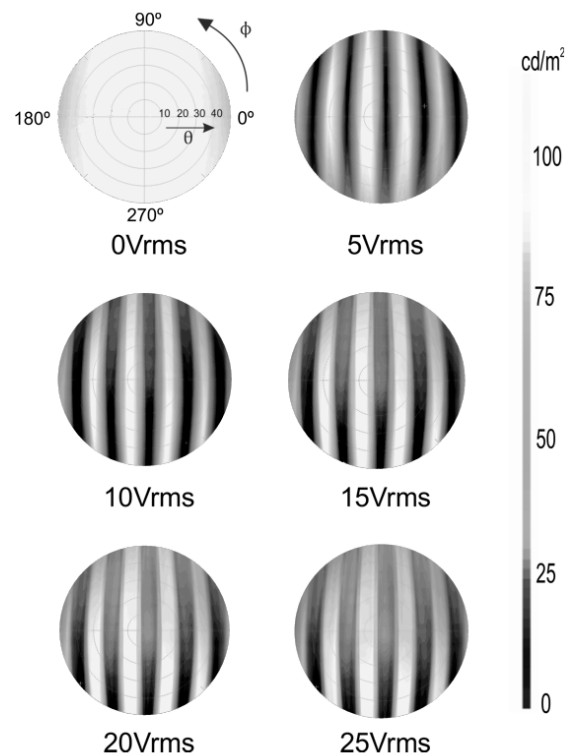


Fig. 8. Distribución angular de la luminancia en función de la tensión del electrodo de control.

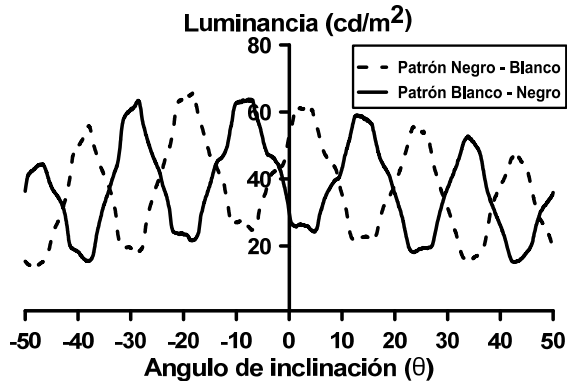


Fig. 9. Distribución angular de la luminancia para la medida de la interferencia.

el centro de las zonas negras. Para el caso más favorable,  $10 V_{rms}$ , se ha estimado la calidad de la respuesta de la lentícula, si se emplea para una aplicación de visión auto-estereoscópica, dando una medida de *crosstalk*. La medida de *crosstalk* se refiere a la relación entre la luminancia debida a una columna de píxeles encendidos de la pantalla (patrón blanco) y la debida a una columna de píxeles apagados de la pantalla (patrón negro). Por tanto, se han presentado de forma secuencial dos patrones en la pantalla, negro-blanco y blanco-negro y se han obtenido las luminancias representadas simultáneamente en la Fig. 9.

Para una determinada inclinación ( $\theta$ ), la luminancia debería proceder únicamente de las columnas de píxeles encendidos tras la mitad de la lente. Por ejemplo, para  $\theta=15^\circ$ ,  $60 \text{ cd/m}^2$  para el patrón negro - blanco. Sin embargo, existe una luminancia residual procedente de la otra mitad de la lente (patrón blanco-negro) de  $20 \text{ cd/m}^2$ . El *crosstalk* medido es del 33% viable para aplicaciones similares a las lentículas fijas que muestran dos imágenes en función de la posición.

## 5. Conclusión

Tras el diseño y construcción de un *array* de lentes cilíndricas modales, empleando una estructura clásica y nuevos materiales, se ha realizado una caracterización de las mismas. El perfil de retardo de fase, generado a través de un electrodo de alta resistividad basado en una película metálica, reproduce un perfil aproximadamente parabólico en el mejor caso. Se observan diferentes efectos como ensanchamiento de la zona central de la lente y estrechamiento de la misma para tensiones fuera del rango óptimo. Estos resultados han dado lugar a nuevas investigaciones sobre la resistividad del material empleado como electrodo de control. También se han tomado medidas teniendo en consideración la distribución angular de luminancia a la salida de la lentícula utilizando como fuente diferentes patrones de luz implementados con una pantalla. La calidad de la respuesta lenticular se ha medido con el cálculo del *crosstalk*. Se demuestra que el comportamiento de la lentícula de CL es similar al de lentículas fijas comerciales.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco de los proyectos TEC2009-13991-C02-01 financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y FACTOTEM2-S2009/ESP-1781 financiado por la Comunidad de Madrid.